



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DAS ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EDGARD ARAÚJO DE LIMA OLIVEIRA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM AÇO 1020 NORMALIZADO SUBMETIDO
A CONCENTRADORES DE TENSÕES**

MOSSORÓ - RN
2018

EDGARD ARAÚJO DE LIMA OLIVEIRA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM AÇO 1020 NORMALIZADO SUBMETIDO
A CONCENTRADORES DE TENSÕES**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, Campus Mossoró, para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador (a): Prof. Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante – UFERSA.

MOSSORÓ - RN
2018

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

A46a Araujo de Lima Oliveira, Edgard.
 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM AÇO 1020
 NORMALIZADO SUBMETIDO A CONCENTRADORES DE TENSÕES
 / Edgard Araujo de Lima Oliveira. - 2018.
 41 f. : il.

 Orientador: Fabrício José Nóbrega Cavalcante.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
 Mecânica, 2018.

 1. Concentradores de tensão. 2. Falha mecânica.
 3. Ensaio de Tração. I. José Nóbrega Cavalcante,
 Fabrício , orient. II. Título.

Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

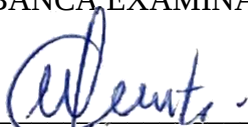
EDGARD ARAÚJO DE LIMA OLIVEIRA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM AÇO 1020 NORMALIZADO SUBMETIDO
A CONCENTRADORES DE TENSÕES**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semiárido – UFERSA,
Campus Mossoró, para a obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

APROVADO EM 12/ 09/2018

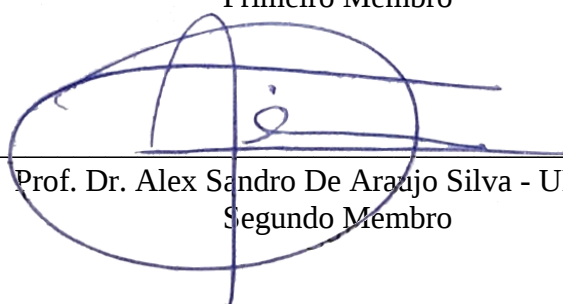
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante – UFERSA
Orientador - Presidente



Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar - UFERSA
Primeiro Membro



Prof. Dr. Alex Sandro De Araujo Silva - UFERSA
Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por todas as coisas boas que aconteceram em minha vida até aqui;
A minha família, parentes e amigos por terem me dado apoio em todos os momentos dessa jornada;

Ao Prof. Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante por ter me ajudado, dando a orientação necessária para o termino desse projeto;

A todos os membros da banca, por aceitarem o convite, se disponibilizando para contribuir com este trabalho.

Aos meus amigos do curso, que sempre me ajudaram quando preciso.

RESUMO

Projetos de engenharia contam com diversos tipos de peças, encaixes e conexões, esses elementos mecânicos possuem pontos concentradores de tensões, que aparecem devido a furos, seções não uniformes, entalhes e outras descontinuidades que podem vir dos processos de fabricação. Devido a essas descontinuidades criam-se concentradores de tensões, que fazem com que o material perca algumas de suas propriedades, fazendo com que possa falhar antes do previsto. Este trabalho analisa um aço 1020 submetido a tratamento térmico de normalização, e compara seus valores ao material sem tratamento, sendo estes também submetidos a furos que atuarão como concentradores de tensões. Após o ensaio de tração, obteve-se as propriedades dos corpos de prova, e foi visto como se deu a perda de suas propriedades, comparando os corpos de prova com e sem furo.

Palavras-Chave: Concentradores de tensão, Falha mecânica, Ensaio de Tração.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva Tensão x Deformação dos Corpos de Prova SFN	31
Gráfico 2 - Curvas Tensão x Deformação dos corpos de prova CFN.....	32
Gráfico 3 - Gráfico Tensão x Deformação SFST	34
Gráfico 4 - Propriedades médias dos Cps.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Composição aço 1020.....	24
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço 1020	24
Tabela 4 - Propriedades SFN.....	31
Tabela 5 – Propriedades médias CFN	32
Tabela 6 - Comparação SFN com CFN.....	33
Tabela 7 - Propriedades SFST	34
Tabela 8 – Propriedades médias CFST.....	35
Tabela 9 - Comparação SFST x CFST	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a)Fratura totalmente dútil; (b) fratura parcialmente dútil; (c) fratura frágil.	14
Figura 2 - Carregamento de tração(a) e distribuição de tensão (b).....	16
Figura 4 - Concentrações de tensões medidas por fotoelasticidade em uma barra plana com degrau e entalhe solicitada à flexão.	17
Figura 5 - Distribuição de tensão próxima a um orifício em uma placa carregada em tração	18
Figura 6 – Fator de concentração de tensão K.....	20
Figura 7 - Fator de concentração de tensão K	20
Figura 8 - Concentração de tensão canto vivo	21
Figura 9 - Concentração de tensão rebaixo.....	21
Figura 10 - Inserção de ranhuras e furos	21
Figura 11- Gráfico tensão x deformação	23
Figura 12 - Dimensões do corpo de prova.....	28
Figura 13 - CP com furo	28
Figura 14 - Corpo de Prova sem furo na máquina de tração	29
Figura 15 - Ensaio de Tração do Corpo de prova	30

LISTA DE SÍMBOLOS

P – Força Aplicada;

A – Área da seção transversal do elemento;

M - O momento fletor aplicado em uma dada seção transversal do componente;

C - É a distância da linha neutra até um dado ponto da seção

I - O momento de inercia da seção transversal em relação à linha neutra;

K_t - Fator geométrico de concentração de tensão;

K_{ts} - Para de cisalhamento;

σ_{nom} – são tensões de flexão nominais;

τ_{nom} – Tensão de cisalhamento nominal;

t - É a espessura da placa.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.1	Objetivos Específicos	11
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	FALHA NOS MATERIAIS DE ENGENHARIA	12
2.2	FORMAS DE CARREGAMENTO	15
2.2.1	Tração	15
2.3	CONCENTRADORES DE TENSÃO	16
2.3.1	Concentração de tensão em solicitações estáticas	22
2.3.2	Concentrações de tensões sob solicitações dinâmicas	22
2.4	ENSAIO DE TRAÇÃO	23
2.5	AÇO	24
2.5.1	Aço 1020	24
2.6	TRATAMENTO TÉRMICO	24
2.6.1	Normalização	25
3.	MATERIAIS E METODOS	27
3.1	METODOLOGIA	27
3.2	MATERIAIS	28
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
3.3.1	Tratamento Térmico	29
3.3.2	Ensaio de Tração	30
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.	CONCLUSÕES	37
	REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, os projetos de engenharia necessitam passar por diversos testes de confiabilidade, mesmo sendo projetos de pequeno ou médio porte, assim é essencial o conhecimento do material que se está trabalhando, bem como suas propriedades e seus limites. Os materiais mais usados na engenharia, sendo um deles o aço, são constantemente utilizados em projetos mais audaciosos, e levados aos seus limites. Materiais esses, que por terem diversos formatos, apresentam pontos mais fragilizados que outros, causados pelos chamados concentradores de tensões.

Concentradores de tensões são normalmente encontrados em praticamente todos os projetos mecânicos, já que para existirem, basta apenas uma seção transversal não uniforme. Temos rasgos de chaveta, eixos com diâmetros diferentes para colocação de engrenagens, furos e rasgos, essas descontinuidades de projeto, diminuem a resistência do material, fazendo com que possam falhar de forma inesperada.

Segundo Hibbeler (2010), “Na prática da engenharia, a distribuição de tensão real não precisa ser determinada. Em vez disso basta saber qual é a tensão máxima nessas seções e, então, o elemento é projetado para resistir a essa tensão quando a carga axial for aplicada”.

Para o cálculo desses concentradores de tensão nas peças, é utilizado um fator geométrico, conhecido por fator de concentração de tensão, K . Norton (2013) define K como a razão entre a tensão máxima e a tensão média que age sobre a menor seção transversal.

Por mais controlado que seja os processos de fabricação dos materiais, sempre haveremos tais concentradores de tensão, que irão diminuir a resistência do material, tais fatos sugerem um estudo aprofundado de como esses concentradores atuam, e assim, diminuir o máximo possível de tais problemas, fazendo com que os materiais suportem tensões próximas das teóricas, e evitando falhas e fraturas repentinas, colocando em risco seres humanos.

Este trabalho tem como principal objetivo a obtenção das propriedades mecânicas de uma barra chata de aço SAE 1020 com e sem furos, tratada termicamente e submetido a ensaio de tração. Por ser um material bastante utilizado na engenharia, de baixo custo e boas propriedades, o estudo é importante para se prevê falhas e estimar a sua vida útil, diminuindo custos e possíveis falhas inesperadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo, observar e analisar o comportamento de um aço submetido a um ensaio de tração, sob influência de concentradores de tensão.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Definir parâmetros para os ensaios mecânicos;
- Determinar as propriedades de aço de baixo carbono por meio do ensaio de tração (força axial);
- Avaliar a influência de um concentrador de tensão na resistência mecânica de um aço carbono.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FALHA NOS MATERIAIS DE ENGENHARIA

A falha nos materiais de engenharia é quase sempre um evento indesejável por diversos motivos, que incluem vidas humanas que são colocadas em risco, perdas econômicas e a interferência com a disponibilidade de produtos e serviços. Embora as causas das falhas e o comportamento dos materiais possam ser conhecidos, a prevenção das falhas é difícil de ser garantida. As causas usuais são a seleção e o processamento dos materiais de uma maneira não apropriada e um projeto inadequado do componente ou sua má utilização. É responsabilidade do engenheiro antecipar e planejar considerando possíveis falhas e, no caso de uma falha de fato ocorrer, avaliar a sua causa e então tomar as medidas de prevenção apropriadas contra futuros incidentes (CALLISTER, 2008).

Analisar as falhas dos materiais e equipamentos é uma necessidade para o moderno sistema de gestão da produção. Usando um sistema de acompanhamento e de controle das principais falhas nos componentes produtivos, o tempo de máquina e de equipamento parado é reduzido (ZOLIN, 2011).

De acordo com Zolin (2011) as disputas de mercado nas empresas não estão mais nos limites nacionais. Assim, faz-se necessário o conhecimento de como ocorrem falhas e quais suas possíveis soluções, a fim de reduzir o tempo perdido na linha de produção e de ser competitivo com padrões internacionais de qualidade e preço.

2.1.1 Fratura dos materiais

Segundo Zolin (2011) o conhecimento das falhas é uma ferramenta importante para compreender o mecanismo que falhou em um equipamento. Analisar as causas disso pode ser o diagnóstico para evitar outras falhas e defeitos mais complexos de funcionamento. De acordo com Callister (2012) as modalidades de falha são: Fadiga, Fluência e Fratura.

Segundo Borges (2010) a fratura é o evento final, geralmente ocorrendo subitamente, resultado da separação do material em duas ou mais partes, causada por sobrecarga imprevisível, falha estrutural ou trinca, conduzindo a perdas econômicas e vidas, além de gerar efeitos ambientais negativos.

Callister (2008) afirma que a fratura simples é a separação de um corpo em duas ou mais partes em resposta à imposição de uma tensão de natureza estática (que é constante ou que varia lentamente ao longo do tempo) e em temperaturas que são baixas relativamente à temperatura de fusão. As tensões aplicadas podem ser de vários tipos, como de tração, compressão, cisalhamento ou torção.

Para os materiais de engenharia, Callister (2008) afirma que são possíveis duas modalidades de fratura, a dúctil e a frágil. Essa classificação é baseada na habilidade de um material apresentar deformação plástica. Sendo que na fratura frágil há pouca ou nenhuma deformação plástica no material, já na fratura dúctil ocorre o oposto, ou seja, uma deformação plástica antes da sua fratura.

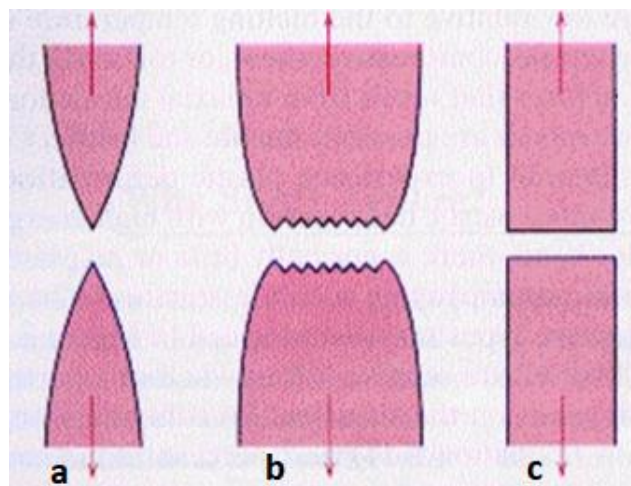
No nível microscópico, a fratura dúctil revela uma superfície com cavidades denominadas dimples, que crescem em torno de precipitados ou inclusões presentes no material e coalescem devido a mecanismos de deformação plástica. A fratura por clivagem ocorre pela separação de planos cristalinos devido à ruptura de ligações atômicas, geralmente de forma transgranular. A união de dois ou mais planos cristalográficos formam degraus que tendem a convergir no sentido da propagação local da trinca, produzindo o aspecto característico de rios (BORGES, 2010).

Callister (2008) também afirma que o processo de fratura envolve duas etapas, que são elas a formação e a propagação de trincas, que são uma resposta a imposição de uma tensão no material.

2.1.1.1 Fratura Dútil

Nos materiais de engenharia, a fratura dútil segundo Callister (2008) sempre é a preferível por duas razões. Em primeiro lugar, devido a fratura frágil ocorrer de forma repentina e catastrófica, sem nenhum aviso prévio, em consequência da propagação espontânea e rápida da trinca. E segundo, porque na fratura dútil, a presença de deformação plástica nos avisa sobre a fratura iminente, e que para a fratura do material com deformação plástica, deve existir um aumento na tensão aplicada, já que um material deformado, apresenta uma maior resistência devido ao encruamento.

Figura 1 – (a) Fratura totalmente dútil; (b) fratura parcialmente dútil; (c) fratura frágil.



Fonte: Callister (2008)

Na Figura 1 nota-se como o tipo de fratura deforma o material, sendo que para a fratura dútil se faz necessário uma maior energia de deformação, pois os materiais dúcteis apresentam uma tenacidade maior que os materiais frágeis. E que segundo Callister (2008) os materiais a nível microscópico, apresentam características distintas.

2.1.1.2 Fratura Frágil

A fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e pela rápida propagação de uma trinca. A direção do movimento da trinca é aproximadamente perpendicular à direção da tensão de tração aplicada e produz superfície de fratura relativamente plana, como visto na Figura 1(c) (CALLISTER, 2008, p.156).

Milan (2017) afirma que a fratura frágil também ocorre em metais dúcteis, e que as condições que isso ocorre são em casos como:

- Baixas temperaturas;
- Seções muito espessas;
- Altas taxas de deformação (impacto);
- Na presença de grandes trincas superficiais.

Callister (2008) afirma que na maioria dos materiais cristalinos frágeis, a propagação da trinca vem das sucessivas e repetidas ruptura de suas ligações atômicas ao longo de seus planos cristalográfico, e que tal processo recebe o nome de clivagem.

Clivagem é descrito por Milan (2017) como sendo a quebra de ligações atômicas específico, e que ela pode ser transgranular e intergranular, onde a transgranular a trinca da fratura passa através dos grãos, e a intergranular a trinca se propaga ao longo dos contornos de grão.

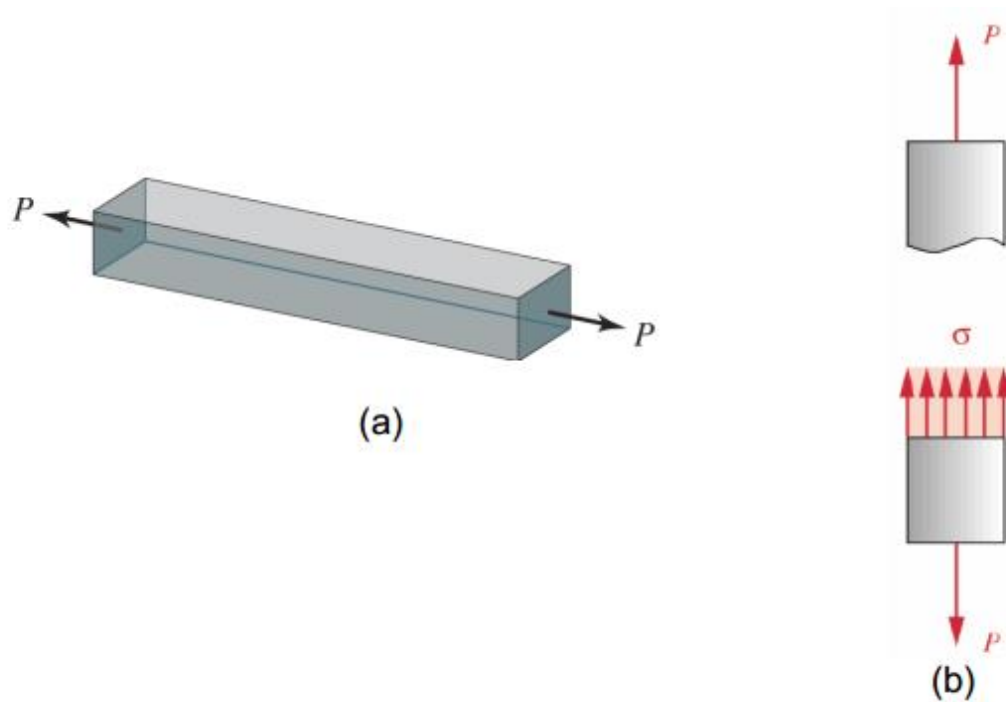
2.2 FORMAS DE CARREGAMENTO

Os esforços externos que atuam nas estruturas e componentes mecânicos são muitos. De acordo com Franqueto (2007) podemos encontrar carregamentos concentrados e distribuídos, variáveis no tempo, estáticos, dinâmicos, aleatórios entre outros. Os principais são de tração, flexão e torção.

2.2.1 Tração

Franqueto (2007) afirma que o carregamento de tração consiste em aplicar duas forças opostas e colineares no centroide da área do elemento e paralelas ao seu comprimento, como na Figura 2(a).

Figura 2 - Carregamento de tração(a) e distribuição de tensão (b)



Fonte: Franqueto (2007).

Com base neste carregamento e aplicando o princípio de Saint-Venant observa-se que a distribuição de tensão ao longo da seção transversal do elemento é constante, como visto na Figura 2(b) e pode ser quantificada como (FRANQUETTO,2007).

$$\sigma_{11} = \frac{P}{A} \quad [1]$$

Sendo A a área da seção transversal do elemento e P o valor da força.

2.3 CONCENTRADORES DE TENSÃO

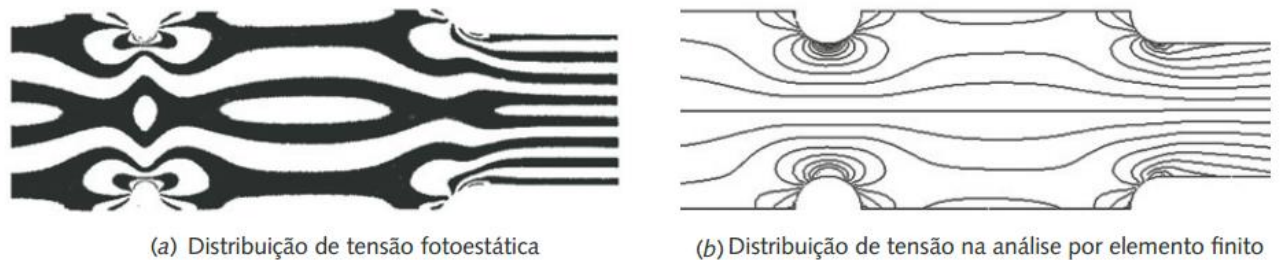
A maioria das máquinas reais tem seções transversais não uniformes, e de acordo com Norton (2013) qualquer uma dessas mudanças na geometria da seção transversal causará concentrações de tensão localizadas.

A existência de rasgos, entalhes, furos, entre outros elementos, altera a constância da área, modificando a distribuição de tensão, fazendo com que a tensão se concentre próximo destes elementos. Ocorre, assim, o fenômeno concentração de tensão (FRANQUETTO, 2007, apud Pilkey, 1997).

A distribuição de tensão elástica ao longo de uma secção transversal de um membro pode ser uniforme, como ocorre em uma barra sob tração; linear, como no caso de uma viga em flexão; ou, ainda, rápida e cheia de curvas, como em uma viga curvada de modo acentuado. A concentração de tensão pode surgir de alguma irregularidade não-inerente ao membro, tal como marcas de ferramentas, furos, entalhes, ranhuras ou roscas (SHIGLEY, 2005).

A Figura 4 mostra a concentração de tensão causada por entalhes e chanfros em uma barra plana sujeita a um momento fletor. Os efeitos de tensão, mostrados na Figura 3(a), foram medidos usando técnicas de fotoelasticidade. A análise de tensão da fotoelasticidade exige a construção de um modelo físico da peça em um tipo de plástico transparente, que é então carregado e fotografado sob luz polarizada, o que leva ao surgimento da tensão sob forma de “franjas” que revelam a distribuição da tensão na peça. A Figura 4(b) mostra um modelo de elemento finito de uma peça com a mesma geometria que é carregada do mesmo jeito que o espécime fotoelástico. Suas linhas são isóbaras de níveis de tensão (NORTON, 2013).

Figura 3 - Concentrações de tensões medidas por fotoelasticidade em uma barra plana com degrau e entalhe solicitada à flexão.



Fonte: adaptado de Norton (2013).

De acordo com Norton (2013) o valor de concentração de tensão em qualquer geometria particular é denotado por um fator geométrico de concentração de tensão K_t para tensões normais, ou K_{ts} para de cisalhamento. E a tensão máxima em um concentrador de tensão local é

$$\sigma_{max} = K_t * \sigma_{nom} \quad [1]$$

$$\tau_{max} = K_{ts} * \tau_{nom} \quad [2]$$

Onde σ_{nom} e τ_{nom} são tensões nominais calculadas para a situação particular de sollicitação e seção transversal local, pressupondo uma distribuição das tensões sobre a seção transversal correspondente a uma geometria uniforme (NORTON,2013).

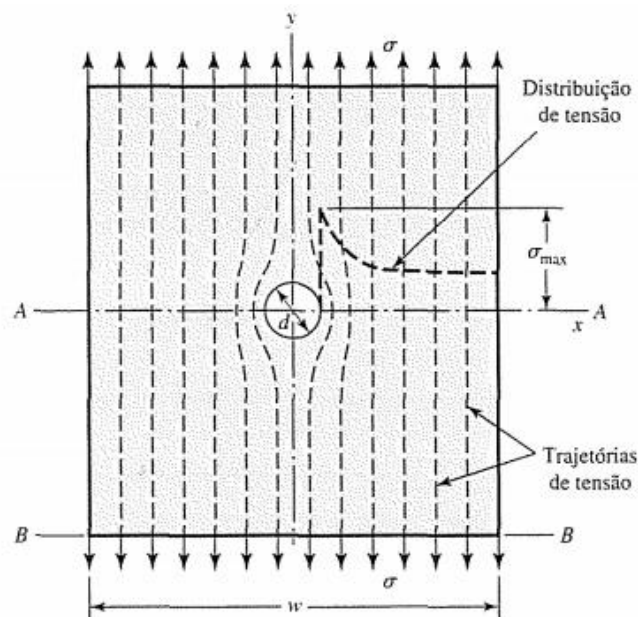
Logo para se encontrar o fator de concentração de tensão, isolando K_t nas Equações 2 e 3, ficando:

$$K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{nom}} \quad [3]$$

$$K_{ts} = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\tau_{nom}} \quad [4]$$

Segundo Shigley (2005) as tensões nominais são difíceis de se definir. E que geralmente é a tensão calculada utilizando-se as equações elementares de tensão e área líquida, ou secção transversal líquida. Ainda que algumas vezes a secção transversal bruta é utilizada em seu lugar, de modo que é sempre prudente verificar sua fonte de K_t e K_{ts} antes de calcular a tensão máxima.

Figura 4 - Distribuição de tensão próxima a um orifício em uma placa carregada em tração



Fonte: Shigley (2005)

A Figura 5 mostra como as tensões são distribuídas próximas a um orifício, e como se comporta as tensões máximas, em que segundo Shigley (2005) a tensão de tração na secção B-B distante do orifício é $\sigma = F/A$, em que $A = wt$ e t é a espessura da placa. Na secção A-A, passando pelo orifício, a área é $A_0 = (w-d)t$ e a tensão nominal é $\sigma_0 = F/A_0$.

O subscrito t em K_t significa que esse fator de concentração de tensão depende, para sua quantificação, apenas da geometria da peça. Isto é, o tipo de material utilizado não tem qualquer efeito sobre o valor de K_t (Shigley, 2005).

Segundo Shigley (2005) a análise das formas geométricas para determinar fatores de concentração de tensão é um problema difícil, de modo que não muitas soluções podem ser encontradas. E que uma delas é da placa infinita, com um furo elíptico, carregada em tração uniforme. O resultado é

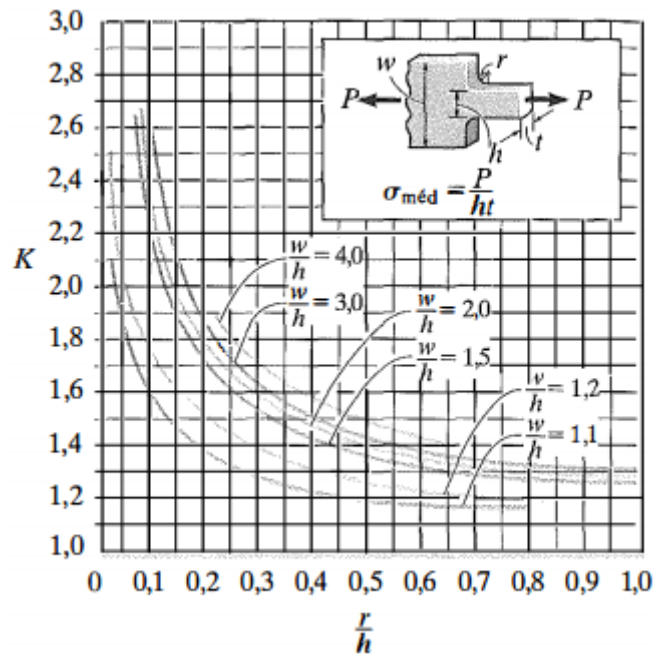
$$K_t = 1 + 2b/a \quad [5]$$

Depois do furo da Figura 5 ser substituída por uma elipse, b identifica a semi-largura, a é a semi-altura e $w \rightarrow \infty$. Logo, para um furo circular, $b=a$ e $K_t = 3$, tal como $w \rightarrow \infty$.

Shigley (2005) afirma que a maioria dos fatores de concentração de tensão são encontrados mediante técnicas experimentais. Embora o método dos elementos finitos venha sendo utilizado, devido ao fato de serem realmente finitos evitam a determinação da tensão máxima verdadeira.

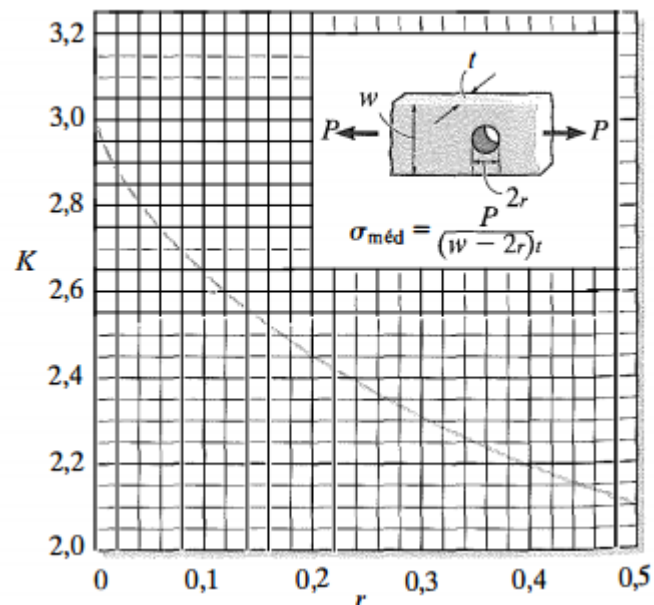
Segundo Hibeller (2010) os valores específicos de K são apresentados em gráficos e em manuais relacionados a análise de tensão, como exemplo as figuras 6 e 7.

Figura 5 – Fator de concentração de tensão K



Fonte: Hibeller (2010).

Figura 6 - Fator de concentração de tensão K

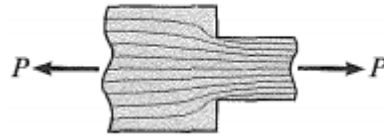


Fonte: Hibeller (2010).

Hibeller (2010) explica que o valor de K é independente das propriedades do material da barra, e que só depende da geometria da barra e do tipo de descontinuidade. À medida que o tamanho r da descontinuidade diminui, a concentração de tensão aumenta. Quando por

exemplo temos uma mudança na seção transversal de uma barra, determina-se teoricamente que um canto vivo, Figura 8, produz um fator de concentração de tensão maior que 3.

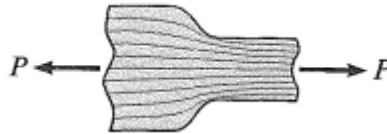
Figura 7 - Concentração de tensão canto vivo



Fonte: Hibeller (2010).

Assim, seguindo Hibeller (2010) a tensão normal máxima será três vezes maior que a tensão normal média na menor seção transversal. Para se reduzir o fator K, para 1,5 por exemplo, pode ser introduzido um filete de rebaixo, como na Figura 9.

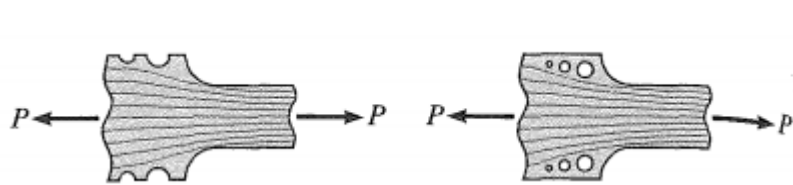
Figura 8 - Concentração de tensão rebaixo



Fonte: Hibeller (2010).

Para uma maior redução, pode-se adicionar por meio de pequenas ranhuras ou furos na zona de transição, figura 10.

Figura 9 - Inserção de ranhuras e furos



Fonte: Hibeller (2010).

Os fatores de concentração de tensão nas figuras 9 e 10 foram determinados com base em um carregamento estático, considerando que a tensão no material não ultrapassa o limite de proporcionalidade (HIBELLER, 2010).

Hibeller (2010) afirma que se o material for muito frágil, o limite de proporcionalidade pode ser igual à tensão de ruptura e, portanto, para esse material, a falha começará no ponto de concentração de tensão quando o limite de proporcionalidade for atingido. Logo uma trinca começará a se formar nesse ponto e uma concentração de tensão mais alta se desenvolverá na ponta dessa trinca. Provocando assim, uma fratura repentina no material.

2.3.1 Concentração de tensão em solicitações estáticas

De acordo com Norton (2013) a ductilidade ou fragilidade do material tem um efeito conhecido na sua resposta à concentração de tensões em solicitações estáticas.

Para materiais dúcteis Norton (2013) diz que eles escoam localmente em torno do ponto de aumento de tensão enquanto as partes do material distantes da descontinuidade geométrica permanecem abaixo do ponto de escoamento. E quando o material escoar localmente, a sua curva de tensão-deformação se torna não linear e com baixa declividade, isso previne aumentos significativos de tensão naquele ponto. E quando a solicitação aumenta, mais material escoar e uma parte maior da secção transversal é trazida para o ponto do escoamento.

Já para materiais frágeis Norton (2013) afirma que eles não escoam localmente, uma vez que não sofrem deformações plásticas significativas. Com isso, concentrações de tensão tem efeito em seu comportamento mesmo sob solicitação estática. Caso a tensão no local do concentrador de tensão exceder seu limite de ruptura, uma trinca começa a se formar, reduzindo o material disponível para resistir à solicitação e aumentar a concentração de tensão na estreita trinca. Levando a peça a falhar rapidamente.

2.3.2 Concentrações de tensões sob solicitações dinâmicas

Segundo Norton (2013) materiais dúcteis sob solicitações dinâmicas se comportam e falham como se fossem frágeis. E que independentemente da ductilidade ou fragilidade do material, o fator de concentração de tensão deve ser aplicado quando cargas dinâmicas estão presentes. E que ainda deve ser levado em conta parâmetros relacionados ao material. Um parâmetro chamado sensibilidade ao entalhe, q , é definido para vários materiais e utilizado para modificar os fatores K_t e K_{ts} , para um dado material sob solicitação dinâmica.

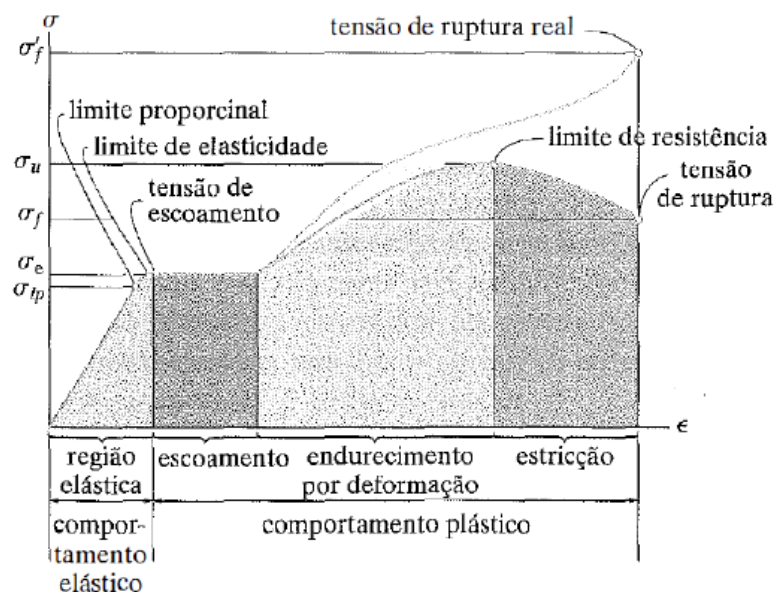
2.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Trata-se de um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido às vantagens de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais (DALCIN).

Segundo Souza (1982) a precisão de um ensaio de tração depende, da precisão dos aparelhos de medida que se dispõe. Com pequenas deformações, pode-se conseguir uma precisão maior na tensão do que quando são atingidas grandes deformações do material.

A velocidade do ensaio é geralmente dada pelos métodos de ensaio estabelecidas pelas diferentes Associações de normas técnicas; quando, porém, se realiza um ensaio de tração para fins de estudo ou pesquisa, essa velocidade pode ser alterada, conforme o caso (SOUZA, 1982). Norton (2013) explica que o resultado nesse tipo de ensaio é dado em formato de gráfico em que se relaciona a força em relação ao alongamento. O ensaio avalia as diversas propriedades da mecânica do material, tais como limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, entre outros. A figura 11 mostra o diagrama de tensão x deformação obtida através do ensaio do material.

Figura 10- Gráfico tensão x deformação



Fonte: Hibeller (2010).

2.5 AÇO

Os aços são ligas metálicas formadas basicamente por ferro e carbono, com a porcentagem de carbono variando entre 0,008 e 2,11%. Os aços podem ser classificados de acordo com sua quantidade de carbono em porcentagem, quanto a sua composição química, sua constituição microestrutura ou quanto a sua aplicação.

2.5.1 Aço 1020

Silva (2010) afirma que o aço 1020 tem em sua composição, aproximadamente 0,20% de carbono, é um aço utilizado para diversos fins, e tem alta tenacidade, boa forjabilidade e baixa dureza. Este aço é usado para diversas aplicações na engenharia, desde equipamentos automobilísticos até parafusos e pregos. A Tabela 1 mostra a composição do aço 1020.

Tabela 1 Composição aço 1020

ABNT/AISI/SAE	C	Mn	P máx.	S máx.
1020	0,18-0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,050

Fonte: Adaptado de Callister (2008).

As propriedades mecânicas do aço 1020 são descritas por Monteiro (2011) e são as seguintes:

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço 1020

Propriedades	Valor
Limite de resistência	394 – 441 MPa
Limite de escoamento	295 – 346 MPa
Alongamento	36,5%
Módulo de Elasticidade	200 - 207

Fonte: Adaptado de Monteiro (2011).

2.6 TRATAMENTO TÉRMICO

Os tratamentos térmicos envolvem operações de aquecimento e resfriamento subsequente, dentro de condições controladas de temperatura, tempo à temperatura, ambiente de aquecimento e velocidade de resfriamento CHIAVERINI (1988).

Chiaverini (1988) afirma que os principais objetivos dos tratamentos térmicos são para:

- Remoção de tensões internas (oriundas de resfriamento desigual, trabalho mecânico ou outra causa);
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhora da ductibilidade;
- Melhora da usinabilidade;
- Melhora da resistência ao desgaste;
- Melhora das propriedades de corte;
- Melhora da resistência corrosão.

Segundo Chiaverini (1988) os materiais metálicos mais submetidos a tratamentos térmicos são as ligas de Fe-C, sobretudo os aços. Porém, muitas outras ligas não-ferrosas devem ser tratadas termicamente. É comum verificar-se que a melhora de uma ou mais propriedades mediante um determinado tratamento térmico é conseguida com prejuízo de outras

2.6.1 Normalização

A normalização consiste na austenitização completa do aço, seguida de resfriamento ao ar. É indicada normalmente para homogeneização da estrutura após o forjamento e antes da tempera ou revenimento. Obviamente, aços que endurecem ao serem resfriados no ar não podem ser normalizados. Ao comparar estruturas normalizadas com recozidas, pode-se afirmar que as estruturas normalizadas (SILVA E MEI, 2010):

- Aço hipoeutetóide: menor quantidade de ferrita proeutetóide e perlita mais fina. Com relação a propriedades mecânicas, a dureza e a resistência mecânica mais elevadas, porém ductilidade mais baixa.
- Aço hipereutetóide: menos carbonetos em rede, distribuição mais uniforme dos carbonetos existentes.

Segundo Silva e Mei (2010) a normalização pode ser usada, portanto para as seguintes aplicações:

- Refino de grão e homogeneização da estrutura visando obter melhor resposta na tempera ou revenimento posterior.
- Melhoria da usinabilidade.
- Refino de estruturas brutas de fusão (peças fundidas por exemplo);
- Obter propriedades mecânicas desejadas.

As temperaturas de austenitização para normalização estão descritas no Quadro abaixo, lembrando que foram baseadas em experiência de fabricação industrial.

Quadro 1 - Temperatura de normalização para aço 1020

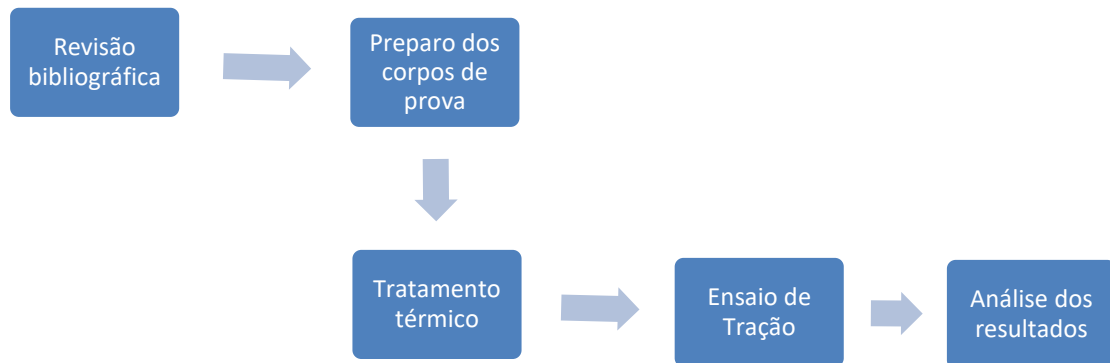
Aços (ABNT/AISI)	Temperatura (°C)
1015	900-925
1020	900-925
1035	870-900
1040	845-870
1050	845-870
1060	815-845
1095	815-845

Fonte: Adaptado de Chiaverini (1988).

3. MATERIAIS E METODOS

3.1 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para este trabalho, está descrita no Fluxograma a seguir.



Onde a revisão bibliográfica foi feita a partir de livros, teses, sites e outros documentos científicos, na segunda etapa começa com o preparo dos corpos de prova, que devido as condições encontradas no laboratório de usinagem da UFERSA, se optou por mandar fabricar os corpos de prova no SENAI, por meio de uma ordem de serviço. Assim, ao final do processo, se recebeu os corpos de provas com as dimensões e com os furos desejados.

A terceira etapa realizou-se o tratamento térmico de normalização no forno do laboratório de soldagem UFERSA. Após o tratamento térmico, foi-se então para o ensaio de tração, que foi realizado na máquina que a UFERSA dispõe, neste ensaio o corpo de prova é submetido a um esforço crescente na direção axial, onde o corpo de prova será tracionado até sua ruptura, assim, a força aplicada no corpo de prova, irá provocar uma deformação na direção do seu esforço.

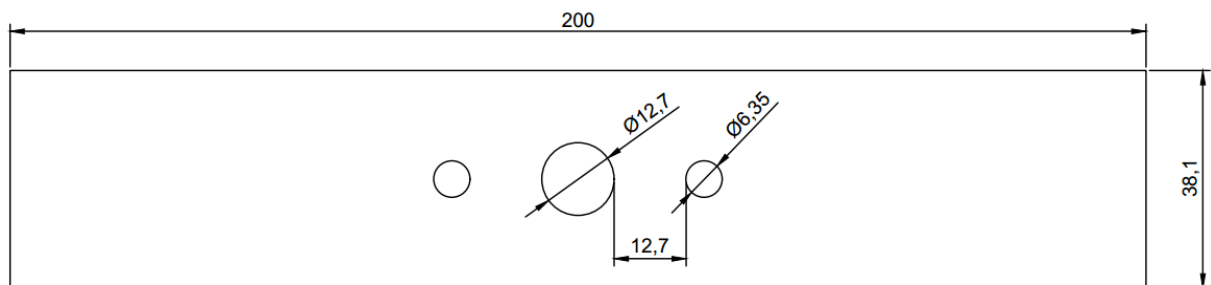
Ao terminar o ensaio de tração, é retirado através do software do equipamento, os gráficos de força vs deslocamento, onde se obtém as propriedades mecânicas do material, como o limite de escoamento, limite de resistência a tração, limite de ruptura, alongamento e algumas outras propriedades.

3.2 MATERIAIS

O material utilizado neste estudo foi o Aço SAE 1020, devido ser um material de baixo custo e muito fácil de ser encontrado, também de ser um dos mais usados devido a essas características. O material foi obtido em uma loja de aços na cidade de Mossoró-RN.

As dimensões dos corpos de provas, bem como as fotos retiradas podem ser vistas nas Figuras 12, 13 e 14.

Figura 11 - Dimensões do corpo de prova



Fonte: Autoria Própria.

Figura 12 - CP com furo



Fonte: Autoria Própria.

Figura 13 - Corpo de Prova sem furo na máquina de tração



Fonte: Autoria Própria.

A espessura do corpo de prova é de 1/8" (3,175mm), e as dimensões da figura 12 são todas em mm. O corpo de prova normalizado sem furo, possui as mesmas dimensões do mostrado na figura 12. O número de corpos de provas para os ensaios são 6 com furos e 4 sem furos, entre os tratados e os não tratados termicamente.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.3.1 Tratamento Térmico

O tratamento de normalização do aço SAE 1020 ocorreu a uma temperatura de 925°C por cerca de 8min (1 hora para cada 25mm de espessura) (Metals,2018). O resfriamento ocorreu ao ar externo forçado, utilizando para isto um secador no modo frio. Devido ao tamanho do forno e o método para resfriamento, foi feito um tratamento por vez, sendo um total de 8 corpos de provas tratados.

3.3.2 Ensaio de Tração

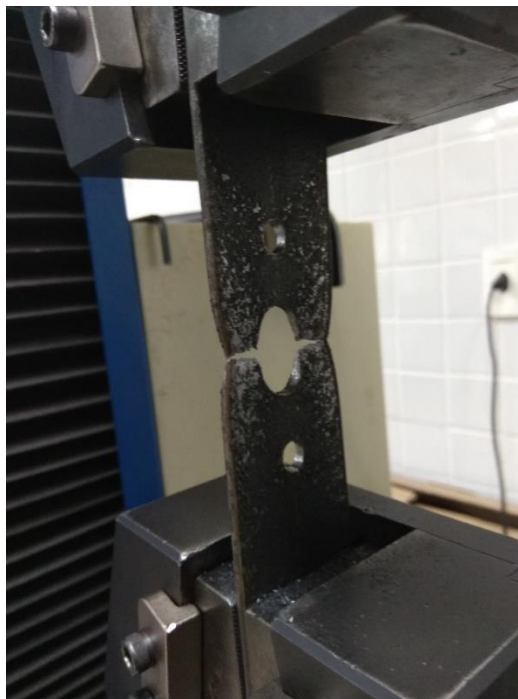
A máquina utilizada para o ensaio de tração foi a disponível no laboratório de ensaios da UFERSA, sendo o ensaio feito até a ruptura do material. Os parâmetros mais importantes a levar em consideração no ensaio são:

- Comprimento útil: 100mm
- Limite de Força: 100kN
- Velocidade do Ensaio :0,05mm/s

O modelo da máquina é da marca EMIC, modelo DL10000 e tem capacidade máxima de 100kN para tração e para compressão, a máquina é conectada a um computador que faz o controle de suas ações através de um software TESC, que ao fim do ensaio, entrega o gráfico em que se tira as propriedades desejadas do material ensaiado.

A Figura 15 mostra o final do processo do ensaio de tração, com o corpo de prova já no início da sua fratura total.

Figura 14 - Ensaio de Tração de um dos Cp's



Fonte: Autoria Própria.

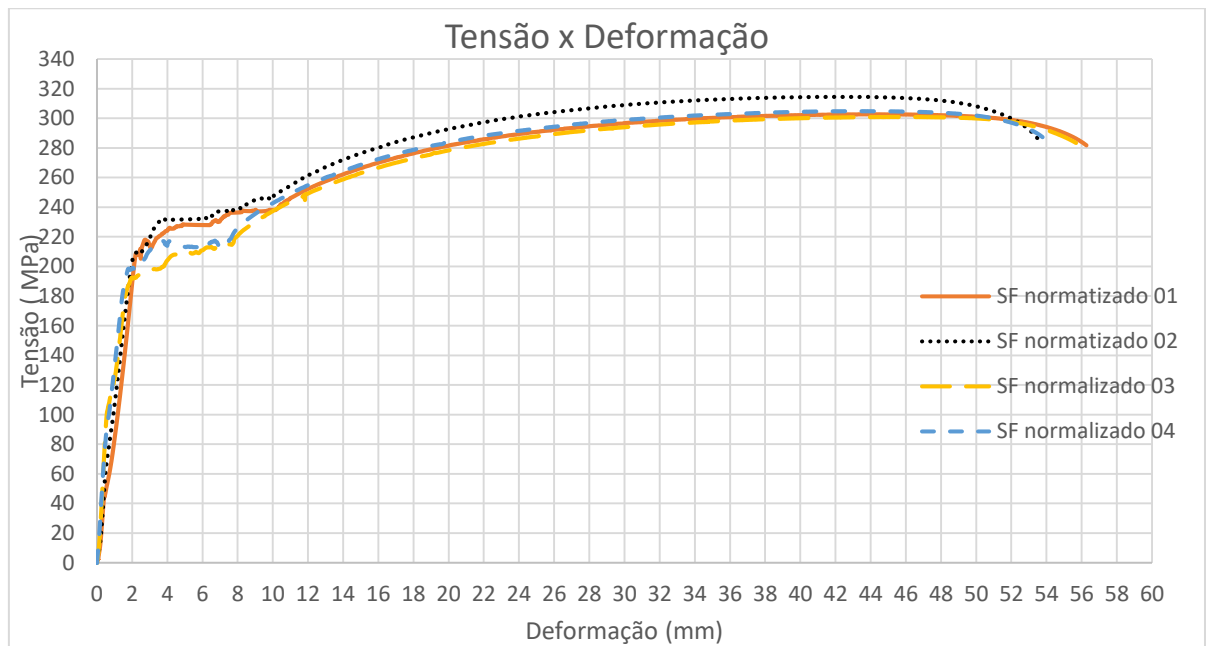
Após os ensaios de tração, o programa da máquina gera os gráficos de força pela deformação do corpo de prova, com isso, se faz possível a obtenção do gráfico de tensão x deformação e das propriedades mecânicas desejadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os corpos de prova do gráfico a seguir são os que não possuem furo, ou seja, não existe concentradores de tensões em toda sua extensão.

O Gráfico 01 demonstra as curvas de tensão deformação obtidas a partir do ensaio de tração realizado.

Gráfico 1 - Curva Tensão x Deformação dos Corpos de Prova SFN



Fonte: Autoria Própria.

A partir do gráfico de tensão x deformação obtido nos ensaios, foi possível determinar as propriedades dos corpos de provas. As propriedades estão na Tabela 04.

Tabela 3 - Propriedades SFN

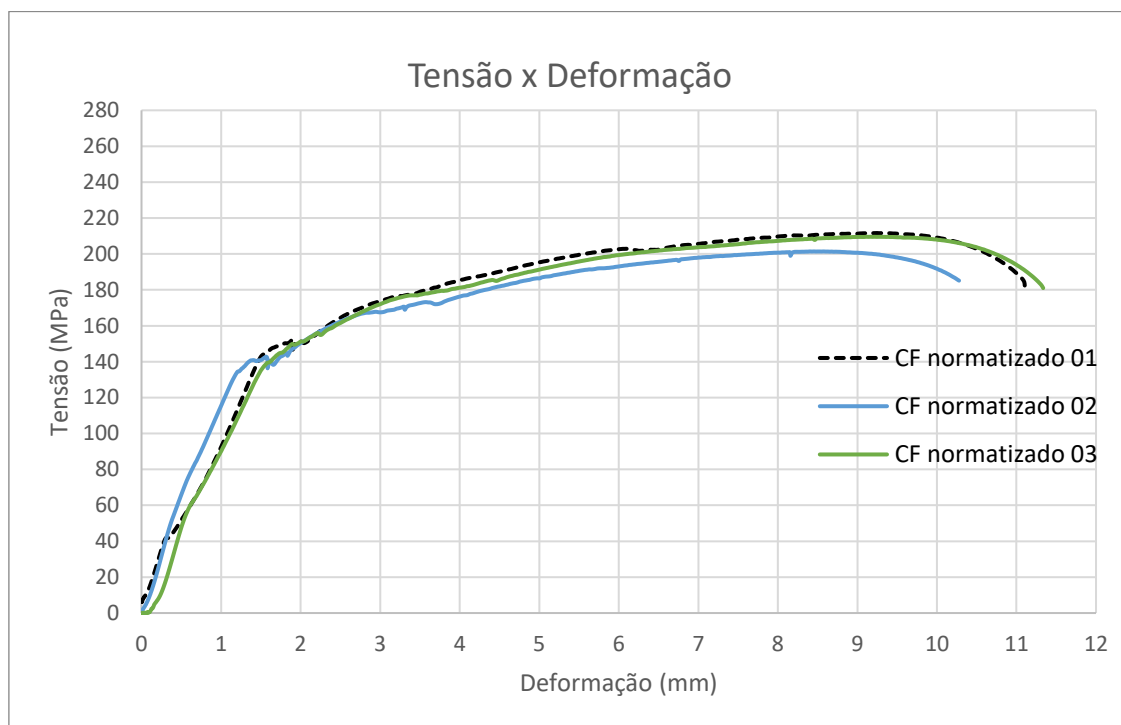
Sem Furo Normalizado (SFN)				
	LE(MPa)	LRT(MPa)	L.Ruptura(MPa)	Alongamento (mm)
Média	250	365,01	339,5	54,68
DesvioP	19,57	6,1	1,29	1,60

Fonte: Autoria Própria.

Como um dos objetivos da normalização é o refino de grão do material, tem-se assim, um material bastante dúctil, suportando grandes deformações plásticas. Pelo desvio padrão, percebe-se que os testes foram praticamente nas mesmas condições, tendo uma variação maior no limite de escoamento.

O Gráfico 02 apresenta os resultados obtidos nos corpos de prova com furo e normalizado.

Gráfico 2 - Curvas Tensão x Deformação dos corpos de prova CFN



Fonte: Autoria Própria.

A partir do Gráfico 02 obtém-se as propriedades do corpo de prova em questão, que estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 – Propriedades médias CFN

Com Furo Normalizado (CFN)				
	LE(MPa)	LRT(MPa)	L.Ruptura (MPa)	Alongamento (mm)
Média	174	248,63	221	10,928
DesvioP	5,56	6,47	2,64	0,513

Fonte: Autoria Própria.

Devido aos furos no material, nota-se a redução nas propriedades do material, devido aos concentradores de tensões existentes no material. Nos resultados, nota-se o baixo desvio padrão, ajudando assim, a validar os ensaios perante as condições nos 3 corpos de provas usados.

A Tabela 6 temos a comparação dos resultados obtidos em cada corpo de prova, sendo para isso, feito uma média dos resultados obtidos em cada caso.

Tabela 5 - Comparação SFN com CFN

Comparação do SFN x CFN				
Propriedade	LE(MPa)	LRT(MPa)	L.Ruptura(MPa)	Along. %
Média do CFN	174	248,63	221	5,46
Média SFN	250	365,01	339,5	27,34
Redução em %	30,4	31,88	34,90	80,01
Fator concentrador				
de tensão kt	1,436			

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados dos corpos de prova sem nenhum tratamento e sem furos, foram obtidos a partir de outro trabalho acadêmico e estão apresentados na Tabela 7.

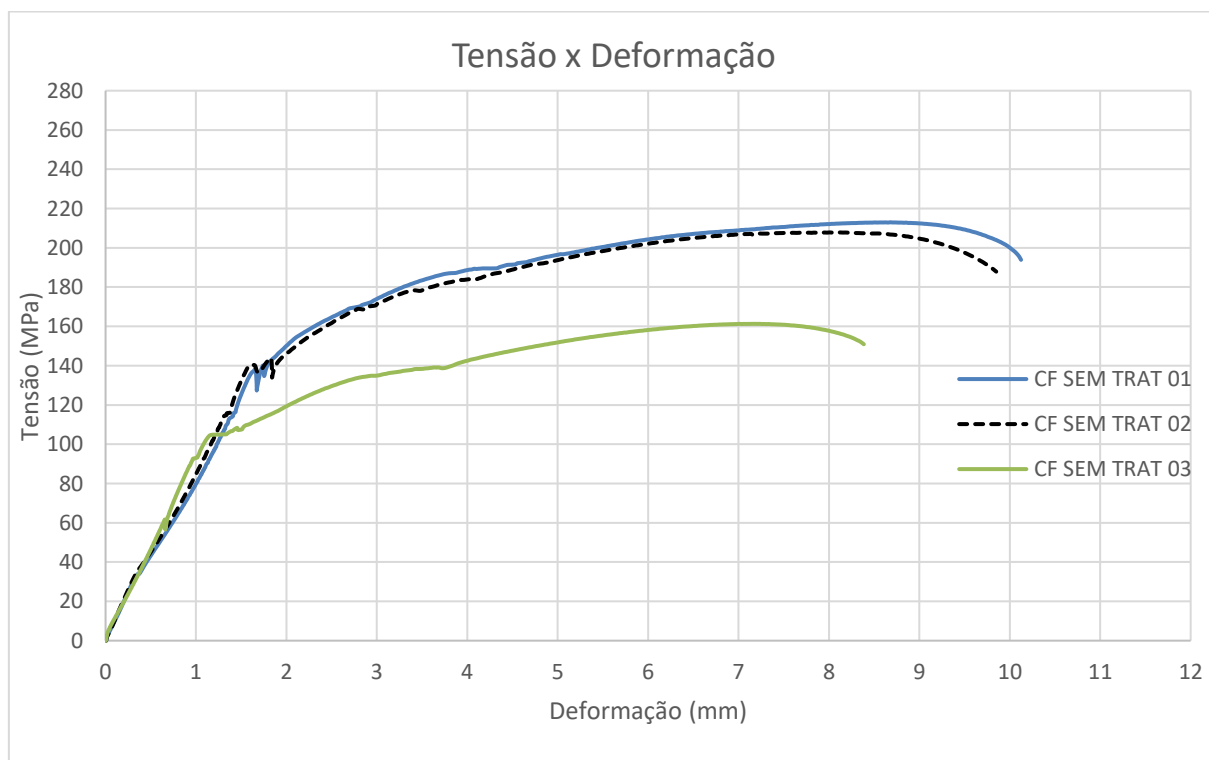
Tabela 6 - Propriedades SFST

Sem Furo sem tratamento (SFST)				
CP	LE(MPa)	LRT (MPa)	L.Ruptura (MPa)	Alongamento (mm)
1	328,34	488,16	417,78	33,95
2	321,91	481,49	407,25	34,02
3	327,25	481,25	412,23	33,98
Média	325,8	483,63	412,42	33,98
DesvioP	3,44	3,92	5,26	0,03

Fonte: Moreira (2018).

Já o Gráfico 3 mostra o resultado do ensaio dos corpos de prova sem tratamento e submetidos a furos. E suas propriedades, retiradas do gráfico, estão na Tabela 8.

Gráfico 3 - Gráfico Tensão x Deformação SFST



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 7 – Propriedades médias CFST

Com furo sem tratamento (CFST)				
CP	LE(MPa)	LRT (MPa)	L.Ruptura (MPa)	Alongamento (mm)
Média	149,66	233	212,33	9,46
DesvioP	22,36	33,95	28,21	0,92

Fonte: Autoria Própria.

As propriedades apresentadas na Tabela 8, mostraram a redução nas propriedades do material, devido aos furos em que ele foi submetido. O desvio padrão dos resultados foi um pouco maior que os demais, sendo estes motivados principalmente por um corpo de prova com valores mais diferenciados dos outros dois.

A comparação dos corpos de prova SFST e CFST estão dispostos na Tabela 9, onde se observa a perda nas propriedades mecânicas do material devido aos concentradores de tensões impostos no material.

Tabela 8 - Comparação SFST x CFST

Comparação SFST x CFST				
Propriedade	LE (Mpa)	LRT(Mpa)	L.Ruptura(Mpa)	Along. %
Média do CFST	149,6667	233	212,3	4,731667
Média SFST	325,8333	483,63	412,42	16,99167
Redução em %	54,0665	51,82267436	48,52335	72,15302
Fator concentrador				
de tensão kt	2,17			

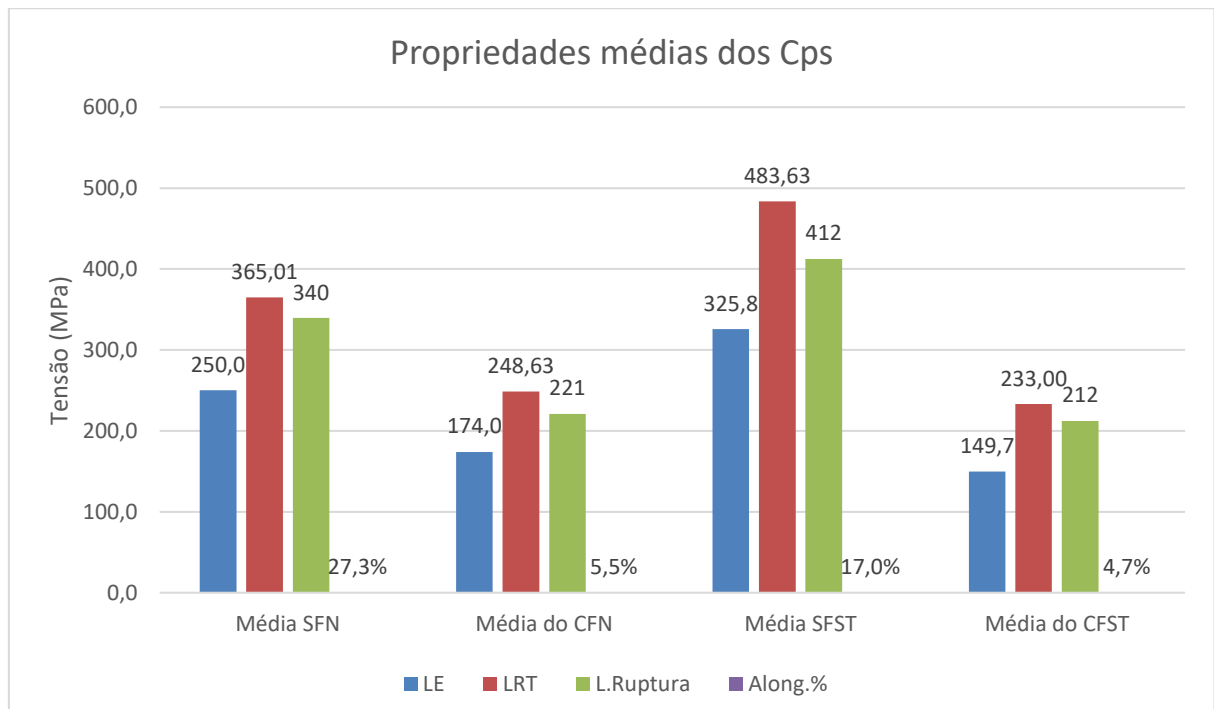
Fonte: Autoria Própria.

Pela Tabela 9 temos uma redução bastante semelhante das propriedades, todas em torno de 50% de redução, assim, pelos resultados, pode se dizer que essa redução é segue uma tendência, já que no caso com tratamento de normalização, os corpos de prova seguiram a tendência de 30% de redução nas propriedades. Porém nos dois casos, o alongamento fugiu um pouco dessa tendência, dando valores bem maiores na sua perda. Já o fator de concentração de

tensão, teve um menor resultado no corpo de prova normalizado, sendo este motivado devido aos aços normalizados terem uma estrutura com baixo nível de tensões residuais.

A tabela 10 mostra a comparação das propriedades mecânicas dos dois tipos de corpos de provas, assim, pode se analisar as propriedades obtidas.

Gráfico 4 - Propriedades médias dos Cps



Fonte: Autoria própria.

Pelo Gráfico 4, percebe-se valores bem distintos nos corpos de prova sem o furo, já nos corpos de prova com o furo temos resultados bastante parecidos entre o CFN e CFST, podendo se dizer que são praticamente iguais em propriedades. Já no caso dos corpos de prova sem furo, temos uma boa vantagem nas propriedades para o SFST, porém este, mostrou um alongamento menor que o SFN.

5. CONCLUSÕES

Pela metodologia utilizada neste trabalho, pode-se perceber o comportamento das propriedades mecânicas do aço utilizado mediante furos, que estariam atuando como concentradores de tensões. Percebe-se a redução de maneira bastante proporcionais de algumas propriedades do corpo de prova normalizado (30% em cada), e em outra propriedade como o alongamento, temos uma redução bem maior (70%), que retira a hipótese que as propriedades diminuiriam de forma proporcional. O mesmo ocorre para os outros corpos de prova, porém sem o tratamento térmico, sendo que as reduções das propriedades também foram proporcionais entre si, entretanto, o alongamento também não seguiu esse padrão, e deu resultados diferentes.

Na comparação dos dois tipos ensaiados, temos uma diferença mínima do CFN e do CFST, assim, dependendo da aplicação, temos que não se tem muita vantagem em normalizar um aço que passará por furos, como é o caso. Já no caso dos sem furos, temos um aço normalizado bastante dúctil e outro sem tratamento com boas propriedades mecânicas, porém com uma ductibilidade menor.

Os ensaios de tração mostraram ser uma excelente ferramenta para a determinação das propriedades mecânicas dos materiais, tendo em vista os resultados bastante parecidos, com um desvio padrão bem baixo.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, Larissa Moreira. **ANÁLISE DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO DO AÇO SAE 1020 TRATADO TERMICAMENTE**. 2018. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2018.

BORGES, Marcelo Lopes Martins. **Análise de propagação de trincas por meio da mecânica da fratura**. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 7.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 705 p

DALCIN, Gabrieli Bortoli. **Ensaio dos Materiais**. 2007. Disponível em: <http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaios_mecanicos.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2018.

DIETER, George E.. **Metalurgia Mecânica**. Quarta edição Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

FRANQUETTO, Paulo Rogério. **Otimização paramétrica de concentradores de tensões clássicos**. 2007. 183 f. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

GGD Metals. **SAE 1020**. Disponível em: < <http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-1020/>>. Acesso em: 10 de maio. 2018.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 656p Janeiro-RJ: LTC, 2002.

MILAN, Júlio César Giubilei. **FALHA**. Florianópolis: Júlio César Giubilei Milan, 2017. 53 slides, color.

MONTEIRO, Alberto de Castro. **Estudo do Comportamento dos Aços Ferramentas Soldados em Fadiga**. 2011. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2011.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ROSA, Edison da. **Análise de Resistência Mecânica**. Santa Catarina: Grante, 2002.

SHIGLEY, J. E. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960p. SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SIMÕES, Daniel de Albuquerque; CASTRO, Jaime Tupiassu Pinho de. **Entalhes melhorados e otimizados**. 2012. Dissertação (Mestrado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012 Disponível em : <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=0921500_2012_Indice.html>. Acesso em : 09/08/2017

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1982. 286 p.

ZOLIN, Ivan. **Ensaaios Mecânicos e Análises de Falhas**. 2011. Disponível em: <http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_autom_ind/ensaaios_mec/161012_ens_mec_an_fal.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2017.